



Durabilidade do betão auto-compactável de elevado desempenho face ao ataque químico

Phelipe Marconi Freitas Mattos^{1,a}, José Luís Barroso de Aguiar^{2,b}, Normando Perazzo Barbosa^{3,c}, Diego Hebert Seixas Costa^{4,d}

¹ Universidade do Minho, Portugal

² Universidade do Minho, Portugal

³ Universidade Federal da Paraíba, Brasil

⁴ Universidade do Minho, Portugal

^aphelipemattos@hotmail.com, ^baguiar@civil.uminho.pt, ^cnperazzob@yahoo.com.br,
^ddiegohebert@hotmail.com

Palavras-chave: Betão, Auto-compactável, Elevado desempenho, Cloretos, Etringita, Dióxido de carbono.

Resumo. A aplicação do betão na construção civil continua sendo intensa e, tendo em vista a existência de impacto sustentável negativo deste material, o desenvolvimento e o conhecimento de novos tipos que minimizem tais ações é imperativo face às novas preocupações mundiais no contexto da sustentabilidade. Surge então o betão auto-compactável de elevado desempenho como uma possibilidade viável em termos de comportamentos técnico, ambiental, social e económico. No entanto, algumas preocupações de cunho patológico surgem e o conhecimento acerca da durabilidade do material se faz necessário. Este trabalho, portanto, visa ao entendimento do comportamento dessa nova tipologia de material cimentício mediante a ação de três agentes químicos específicos: os cloretos, os sulfatos e o dióxido de carbono, com o intuito de avaliar as alterações de desempenho a partir de mudanças na dosagem de cimento e de variações de temperatura nos primeiros dias de cura do betão para o ataque de sulfatos. Do ponto de vista deste, avalia-se com maior ênfase a formação da etringita secundária (DEF), composto expansivo que pode comprometer consideravelmente as condições de serviço do elemento de construção. Os estudos experimentais decorrem da investigação de três composições distintas, uma de referência convencional com dosagem de cimento de 400 kg/m³ (BC_400) e duas caracterizadas como auto-compactáveis de elevado desempenho, sendo uma com dosagem do ligante de 500 kg/m³ (BACED_500) e outra de 600 kg/m³ (BACED_600). As condições de cura foram também variadas entre as 24h e 48h de vida do material, submetendo os provetes a temperaturas de 20°C, 50 °C e 80°C. Os resultados apontam que os BACED em estudo confirmam a auto-compactibilidade e o elevado desempenho. Para o ensaio de cloretos, o BACED_600 apresentou menor difusão dos íons, seguido pelo BACED_500 e o BC_400. Em termos do ensaio de sulfatos, na indicação de DEF há considerável transformação da etringita primária em monossulfato, sendo o BC_400 e o BACED_600 os que apresentaram maior suscetibilidade à formação do composto tardio devido à temperatura de cura; no ataque por fonte externa de sulfatos, os BACED indicaram perda de massa similar, abaixo do BC_400. Em termos de carbonatação, o BACED_500 é mais suscetível que o BACED_600.

1. Introdução

As obras de engenharia apresentam, ao longo do tempo, uma evolução tecnológica significativa que tem proporcionado uma melhor servicibilidade aos usuários. Em decorrência

deste crescimento, a durabilidade e o desempenho desses produtos e sistemas, construídos e em desenvolvimento, são questões que têm preocupado diversos setores da construção civil, o que demanda estudos mais intensos acerca de configurações deletérias.

Ao longo dos anos, as estruturas e construções no mundo têm exigido cada vez mais dos materiais que dispõem. A busca incessante pela otimização do produto torna a existência de objetos com nível tecnológico elevado um fator indispensável para a evolução da engenharia civil no mundo. Neste contexto se inserem os betões auto-compactáveis (BAC) e os de elevado desempenho (BED). Apresentando resultados diferenciados do convencional, esses materiais têm se consolidado no mercado da construção como alternativas viáveis na busca pela referida otimização. Para tirar proveito das vantagens apresentadas por essas duas tipologias de betão, surge o betão auto-compactável de elevado desempenho (BACED). É sabido, portanto, que o betão é um material sensível a vários tipos de agentes agressivos, os quais podem atuar com maior ou menor intensidade, a depender das características do material e das condições de exposição. Dentro desta gama de possíveis situações deletérias, duas conjunturas tomam destaque no âmbito do BACED, são o ataque de cloretos e o ataque de sulfatos com formação de etringita secundária. Além disso, o nível de resistência à carbonatação é outro fator importante no estudo da durabilidade de betões.

O ataque de cloretos é um tipo de atuação insalubre bastante perigosa no que diz respeito à durabilidade do betão, mas principalmente quanto à deterioração do aço em situações de betão armado. Os íons de cloro promovem a corrosão do elemento metálico podendo levar à sua total depreciação e colocar em risco a vida da construção e dos seus usuários.

A formação de etringita secundária por meio de íons SO_4^{2-} , por sua vez, se caracteriza como degradante a partir do momento em que é expansiva e promove a microfissuração do betão, como afirma Collepardi [7], acarretando em grande prejuízo ao desempenho do material. Uma correlação importante para o desenvolvimento deste estudo com betões de elevado desempenho decorre do fato de que tal contexto tem o princípio de que, teoricamente, quanto maior o consumo de cimento, maior o potencial para a formação tardia da etringita. Sendo assim, sabendo-se que os BED assumem dosagens de cimento altas, normalmente acima de 400 kg/m^3 , aponta-se a viabilidade para o entendimento deste fenômeno nesse tipo de betão. O fenômeno de carbonatação tem como principal implicância relevante a redução do pH do material. Isto, no entanto, para aplicações de betão armado, promove a despassivação da armadura, tornando-a suscetível à corrosão, conforme Souza e Ripper [11].

Outro cenário que justifica esta pesquisa está inserido no âmbito da questão sustentabilidade. Nos últimos anos a Europa e o mundo têm discutido com maior veemência o assunto, visto que a minimização dos impactos ambientais, sociais e econômicos são um fator que ganha cada vez mais força, principalmente devido às grandes alterações que envolvem o planeta. O BACED surge então como um material potencial em ganhos nos âmbitos sustentáveis, tendo em vista seu caráter especial e de desempenho superior ao convencional.

Este trabalho, portanto, visa ao entendimento do comportamento dessa nova tipologia de material cimentício mediante a ação de três agentes químicos específicos: os cloretos, os sulfatos e o dióxido de carbono, com o intuito de avaliar as alterações de desempenho a partir de mudanças na dosagem de cimento e de variações de temperatura nos primeiros dias de cura do betão para o ataque de sulfatos. Do ponto de vista deste, avalia-se com maior ênfase a formação da etringita secundária, composto expansivo que pode comprometer consideravelmente as condições de serviço do elemento de construção.

2. Materiais e Metodologias.

Esta investigação tem como objetivo analisar o comportamento de betões auto-compactáveis de elevado desempenho mediante o ataque de cloretos, de sulfatos e do dióxido de carbono. Os ensaios realizados foram: difusão de cloretos por migração em regime não estacionário; ataque de sulfatos por fonte interna; ataque de sulfatos por fonte externa; resistência à carbonatação. Para complementar estes testes, bem como atender ao padrão comumente desenvolvido em investigações que envolvem betão, realizou-se também os ensaios de resistência à compressão e a avaliação da porosidade do material.

Partindo desse escopo, e considerando que um dos motivos da formação da etringita secundária é o elevado calor de hidratação, opta-se por betões com alto consumo de cimento. Define-se então o betão de referência convencional – 400 kg/m^3 – e os betões auto

compactáveis de elevado desempenho – 500 kg/m³ e 600 kg/m³. Outro fator importante na ocorrência de etringita secundária é a temperatura de cura. Logo, propõe-se variar as condições de cura entre as 24h e 48h de vida do material, entre 20°C, 50 °C e 80°C.

Em termos de classe de resistência e classificação quanto às propriedades no estado fresco, expectou-se caracterizar o betão convencional dentro de uma faixa adequada de trabalhabilidade e aqueles de maior consumo de cimento como BACED, não restringindo-os. É importante ressaltar que um dos objetivos do trabalho é o de retratar a situação mais próxima possível de aplicação do material no mercado da construção.

O método de cálculo a ser utilizado nas dosagens dos betões é o proposto por Faury, que, segundo Coutinho [2], mensura as quantidades de insumos do material a partir de uma curva de referência ótima, que considera principalmente o fator trabalhabilidade.

As metodologias de ensaio foram baseadas em normas portuguesas, a LNEC E-463/2004: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário [4] para o ensaio de ataque de cloretos e a NP-1378: Agregados – Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio [8] para o ensaio de ataque de sulfatos. Esta última, devido à inexistência de uma norma portuguesa definida para ataque de sulfatos em betão. O ensaio de carbonatação foi baseado na especificação técnica do Comitê Europeu de Normalização FprCEN/TS 12390-12 [3] de 2010.

Os materiais utilizados na fabricação dos betões foram conforme indica a figura 1.

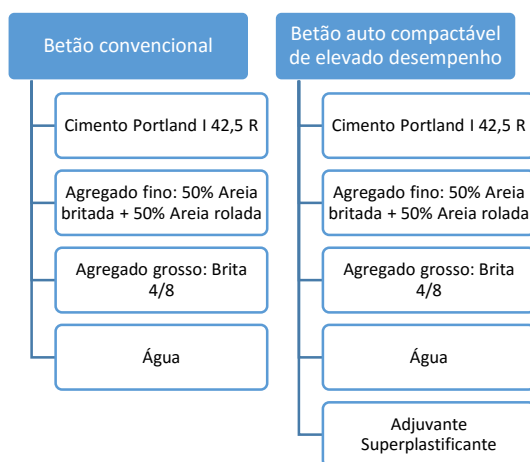


Figura 1: Configuração dos constituintes dos betões. Fonte: Acervo pessoal (2016)

2.1. Betão Convencional 400 kg/m³. No procedimento de dosagem deste betão pelo método de Faury foram definidos inicialmente a dosagem do cimento, a razão água/ligante, os parâmetros A e B da curva de Faury e as curvas granulométricas dos agregados despendidos. Utilizou-se uma dosagem de cimento de 400 kg/m³, a relação água/ligante adotada foi de 0,55 e a escolha dos parâmetros A e B resultou nos valores 34 e 2, respectivamente. A tabela 1 sintetiza esta dosagem.

Tabela 1: Composição BC_400. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Material	Dosagens por m ³ de Betão	
Cimento I 42,5 R	400,00	kg
Areia média 0/4 - britada	544,975	kg
Areia média 0/4 - rolada	544,975	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	514,19	kg
SP	0,00	kg
Água	220,00	l
Relação água/cimento	0,55	

2.2. Betão Auto-compactável de Elevado Desempenho 500 kg/m³. Neste caso, utilizou-se uma dosagem de cimento de 500 kg/m³, uma relação água/cimento de 0,40, o teor de superplastificante de 3%, considerando 20% de sólidos, e os parâmetros A e B 34 e 2, respectivamente. Quanto à definição da relação a/c, pondera-se aqui os requisitos de durabilidade, bem como o limite de 0,40 defendido por Camões [1] para betões de elevado desempenho. A percentagem de superplastificante, por sua vez, é acima da média. Contudo, Aguiar [5] respalda a decisão afirmando que o uso do adjuvante deve ser inferior ao limite do fabricante e não ultrapassar o valor de 50 g SP/kg de cimento, mas que a influência positiva de uma maior dosagem do adjuvante no âmbito do desempenho e da durabilidade pode justificar o ato. O teor de 3% no BACED de 500 kg/m³, considerando 20% de teor de sólidos, resulta em aproximadamente 30 g de SP/kg de cimento, abaixo do limite estabelecido por Aguiar. A tabela 2 indica a composição.

Tabela 2: Composição BACED_500. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Material	Dosagens por m ³ de Betão	
Cimento I 42,5 R	500,00	kg
Areia média 0/4 - britada	524,05	kg
Areia média 0/4 - rolada	524,05	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	526,18	kg
SP	15,19	kg
Água	200,00	l
Relação água/cimento	0,40	

2.3. Betão Auto-compactável de Elevado Desempenho 600 kg/m³. Este betão tem, por coerência de investigação, as mesmas características de composição do BACED_500, haja vista a necessidade de comparação de resultados entre materiais semelhantes. Há, no entanto, a alteração do consumo de cimento para 600 kg/m³ e do teor de superplastificante para 2%, sendo este em virtude do ajuste causado pelo aumento do consumo do ligante. A tabela 3 apresenta a composição do BACED_600.

Tabela 3: Composição BACED_600. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Material	Dosagens por m ³ de Betão	
Cimento I 42,5 R	600,00	kg
Areia média 0/4 - britada	441,475	kg
Areia média 0/4 - rolada	441,475	kg
Brita 4/8 BRITAMINHO	506,49	kg
SP	11,60	kg
Água	240,00	l
Relação água/cimento	0,40	

2.4. Fabricação dos betões. Visando a análise das propriedades dos materiais em estado fresco, as tabelas 4 a 6 indicam os valores obtidos na realização do slump test, para o betão convencional, e dos ensaios de espalhamento e T₅₀₀ para os betões auto-compactáveis de elevado desempenho. Os valores apontados a seguir indicam desempenho elevado por parte dos betões especiais em estudo no que diz respeito à trabalhabilidade e à viscosidade. Os BACED satisfazem as condições de auto-compactabilidade estabelecidas na EN 12350-8.

Tabela 4: Resultado dos ensaios com o betão fresco BC_400. Fonte: Acervo pessoal (2016)

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de abaixamento (mm)	100	60	90	83

Tabela 5: Resultado dos ensaios com o betão fresco BACED_500. Fonte: Acervo pessoal (2016)

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de espalhamento (mm)	580	560	600	580
T ₅₀₀ (s)	7	6	5	6

Tabela 6: Resultado dos ensaios com o betão fresco BACED_600. Fonte: Acervo pessoal (2016)

	Amassadura 1	Amassadura 2	Amassadura 3	MÉDIA
Ensaio de espalhamento (mm)	790	750	775	772
T ₅₀₀ (s)	1	1,8	2,5	1,8

2.5. Ensaio de resistência à compressão. O ensaio mecânico foi realizado com o objetivo de identificar possíveis alterações na resistência à compressão entre os tipos de betão e em virtude das variações nas condições de cura dos materiais.

A partir da EN 206-1 foram definidas as classes de resistência expectantes para cada tipo de betão. Conforme já supracitado, para o betão convencional, objetivou-se uma classe mínima C20/25; para os de elevado desempenho, ao menos uma classe C35/45, indicando uma resistência acima da estipulada pelo ACI para BED, de 41 MPa.

Executou-se o ensaio aos 2 dias e aos 28 dias para os três tipos de betão, curados às temperaturas de 20°C, 50°C e 80°C. Aos 70 dias foi realizado outro ensaio para provetes curados a 20°C. Sendo os provetes utilizados do tipo cúbicos com arestas de 100 mm, a velocidade de aplicação da carga foi de 7 kN/s, de acordo com o equipamento utilizado.

2.6. Ensaio de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário. Foram desenvolvidos provetes cilíndricos de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura para cada tipo de betão. Em seguida, após a cura completa dos betões – 28 dias, foram realizados cortes com espessura de 50 ± 2 mm, descartando as extremidades dos provetes em no mínimo 10 mm, constituindo então 3 amostras de 100 mm de diâmetro e 50 ± 2 mm de altura para cada tipo de betão.

Em seguida, inseriu-se as amostras em câmara de vácuo para que se procedesse a tratamento por vácuo. Posteriormente foi adicionada ao recipiente uma solução saturada de Ca(OH)_2 e se manteve esta configuração na câmara de vácuo por mais 1h. A seguir, expôs-se à pressão ambiente as amostras imersas na solução de hidróxido de cálcio, durante 18h. Após a colocação das amostras nas mangas e fixação com abraçadeiras adequadas, foi necessário realizar o ajuste da voltagem a partir da identificação da corrente inicial para cada tipo de betão, de acordo com o Anexo 2 da E 463. É importante observar que o ajuste também ocorreu devido ao fato de se tratar de betões com elevada dosagem de ligante, tal que se considerou a composição com 400 kg/m³ como normal e de referência, sendo base para o cálculo das novas voltagens para os betões de 500 kg/m³ e o de 600kg/m³. A diferença de potencial aplicada foi de 15 V para o BC_400 e 25V para o BACED_500 e o BACED_600.

2.7. Ensaio de ataque de sulfatos por fonte interna – formação de etringita secundária.

O ensaio de sulfatos por fonte interna ocorreu por meio de quantificação de etringita secundária formada, a partir de análise em difratômetro de raio x. As avaliações por DRX foram realizadas com amostras em pó provenientes das camadas superficiais dos provetes ensaiados mecanicamente por resistência à compressão. Os ensaios foram realizados aos 28 e aos 70 dias de vida dos betões, permitindo identificar a quantidade de etringita secundária formada, bem como seu comportamento ao longo do tempo. Por meio de Microscopia

Eletrônica de Varrimento foram realizadas imagens que contextualizam o comportamento dos materiais aos 70 dias.

2.8. Ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa. Alternando a origem dos íons sulfatos para o ambiente externo, optou-se por submeter os betões ao ensaio de ataque de sulfatos baseado na NP 1378 – Agregados: Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio [8], a fim de se analisar a formação da etringita secundária, mas também em virtude de identificar a durabilidade dos betões quanto ao ataque de sulfatos.

Em Portugal, não há disponível até o momento uma norma que direcione o ensaio de ataque de sulfatos em betões. Logo, faz-se uso da NP 1378 [8] de forma a aproximar ao máximo as diretrizes à situação vigente. Antes de iniciar o processo, lixou-se as superfícies dos provetes e, em seguida, foram colocados por 24h em estufa a 105°C para a secagem.

O ensaio se deu pela submissão de 3 provetes de cada tipo de betão a uma solução sulfatada, cessando no momento em que houve perda de massa dos exemplares. A exposição à solução ocorre por meio de ciclos de imersão (20h) e secagem(48h). Foram necessários 9 ciclos.

2.9. Ensaio de determinação do potencial de carbonatação. Foram utilizados dois provetes cúbicos de 100 mm de aresta para cada tipo de betão estudado, curados por 90 dias a 20°C, submetidos a uma humidade relativa em torno de 65%. Após 90 dias, os provetes foram impermeabilizados em quatro faces, deixando apenas duas faces paralelas expostas. Em seguida, os provetes foram inseridos em câmara de carbonatação com 4% de CO₂.

As profundidades de carbonatação ocorreram aos 7, 14, 30 e 40 dias. O processo de medição se deu pela aplicação de indicador ácido-base em amostras de 50mm de espessura retiradas dos provetes ensaiados.

3. Resultados e discussão.

3.1. Resistência à compressão. As tabelas 7 a 9 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 7: Resultados ensaio de resistência à compressão aos 2 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	14,6	25,6	18,3
50°C	18,0	38,5	38,0
80°C	18,5	36,3	38,0

Tabela 8: Resultados ensaio de resistência à compressão aos 28 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	28,2	52,3	47,6
50°C	26,3	53,9	46,6
80°C	22,5	47,3	40,2

Tabela 9: Resultados ensaio de resistência à compressão aos 70 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre as 24h e 48h	Resistência à compressão (MPa)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	39,3	62,0	59,7

O betão auto-compactável de elevado desempenho de 500 kg/m³ foi o que apresentou comportamento mais satisfatório do ponto de vista do desempenho mecânico. O BACED_600 apesar de indicar maiores ganhos de resistência entre os 2 e os 28 dias quando submetido à cura térmica, exibiu resultados efetivos abaixo do BACED_500, que, no contexto global, foi o material de melhor desempenho mecânico à compressão. Isto se deu em virtude da ocorrência do fenômeno de retração no BACED_600, o que o tornou com rede capilar mais desenvolvida e portanto com maior teor de vazios. É importante observar que os betões especiais não atingem o valor mínimo para classificação como BER indicado pela EN 206-1, de 60 MPa, mas atingem aquele apontado pela ACI, de 41 MPa. Isto, no entanto, não inviabiliza suas caracterização como BED, conforme indicado a seguir.

3.2. Difusão de cloretos por migração em regime não estacionário. Sabe-se que a difusão dos íons Cl⁻ é potencializada quando o betão é permeável e possui rede capilar interna desenvolvida. Logo, sabendo-se que o BC_400 apresenta maior suscetibilidade à ocorrência da porosidade diante de uma presença de água mais massiva, é coerente que haja maior difusão de cloretos neste betão. Por outro lado, o BACED_600, por apresentar maior teor de ligante, baixa relação a/c e reduzidas segregação e exsudação no estado fresco, resultando em um betão de superfície menos porosa após sua cura, está menos suscetível à difusão de cloretos.

Realizados os devidos cálculos, obteve-se os resultados que seguem na tabela 10.

Tabela 10: Resultados ensaio de difusão de cloretos. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Composição	Amostra	Ø (mm)	L (mm)	U (V)	T _M (°C)	t (h)	Profundidade penetração de cloretos (mm)								D _{NSSM} (x 10 ⁻¹² m ² /s)	D Médio (x10 ⁻¹² m ² /s)
							1	2	3	4	5	6	7	x _{DM}		
BC_400	A	99,7	50,4	15,0	18,4	24,0	34,5	33,4	30,4	30,1	30,4	32,1	37,3	32,6	31,53	36,12
	B	99,8	50,2	15,0	18,4	24,0	45,2	38,5	37,9	37,3	33,6	36,9	42,1	38,8	37,89	
	C	99,7	50,2	15,0	18,4	24,0	44,2	39,4	35,9	36,9	34,9	40,6	46,9	39,8	38,94	
BACED_500	A	99,8	51,4	25,0	17,9	24,0	24,1	17,5	15,5	14,6	15,2	19,7	28,3	19,3	10,74	11,31
	B	100,0	51,3	25,0	17,9	24,0	26,2	21,5	16,0	17,9	16,7	19,0	31,1	21,2	11,88	
	C	99,8	50,8	25,0	17,9	24,0	26,0	20,8	16,0	18,2	14,1	20,6	27,2	20,4	11,32	
BACED_600	A	100,5	49,3	25,0	17,9	24,0	15,9	14,7	14,8	16,5	15,9	15,8	20,9	16,3	8,65	9,40
	B	99,8	51,9	25,0	17,9	24,0	35,7	16,8	14,4	13,2	14,1	14,4	19,4	18,3	10,24	
	C	100,0	51,0	25,0	17,9	24,0	17,7	15,6	14,9	17,3	17,1	16,8	19,7	17,0	9,31	

Classifica-se, ainda, os betões quanto às suas resistências ao ataque de cloretos. Luping [10] propôs uma classificação, conforme indica a tabela 11.

Tabela 11: Classificação quanto à de difusão de cloretos. Fonte: Luppig (1996)

Coefficiente de difusão em estado não estacionário, D _{ns}	Classe de resistência à penetração de cloretos
D _{ns} ≥ 15 x 10 ⁻¹² m ² /s	Reduzida
10x10 ⁻¹² m ² /s < D _{ns} < 15x10 ⁻¹² m ² /s	Moderada
5 < 10 ⁻¹² M ² /s < D _{ns} ≤ 10x10 ⁻¹² m ² /s	Elevada
2. 5 X 10 ⁻¹² m ² /s < D _{ns} ≤ 10x10 ⁻¹² m ² /s	Muito elevada
D _{ns} < 2. 5 X 10 ⁻¹² m ²	Ultra elevada

Portanto, o BC_400 apresenta classe de resistência à penetração de cloretos reduzida, o BACED_500 moderada e o BACED_600 elevada. Isto, pois, ratifica as condições de elevado desempenho e de maior durabilidade desses últimos.

3.3. Ataque de sulfatos por fonte interna – formação de etringita secundária. A análise da ocorrência de etringita tardia foi realizada pela quantificação do composto aos 28 e aos 70 dias por difração de raio x (Tabelas 12 e 13).

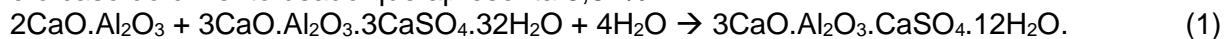
Tabela 12: Teor de etringita aos 28 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	0,0%	19,22%	5,43%
50°C	17,51%	21,04%	30,95%
80°C	0,0%	18,64%	0,0%

Tabela 13: Teor de etringita aos 70 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	0,0%	0,0%	0,0%
50°C	2,98%	0,0%	0,0%
80°C	0,0%	0,0%	0,0%

O fato mais relevante neste ensaio decorre da massiva ausência de etringita aos 70 dias. De acordo com a literatura, isto se dá devido à formação de monossulfato a partir da etringita primária formada, conforme indica a equação (1), quando há teor de C₃A acima de 5%, como é o caso do cimento usado que apresenta 5,82%.



Metha e Monteiro [9] defendem que a conversão em monossulfoaluminato de cálcio hidratado quando do uso de cimentos Portland com mais de 5% de C₃A pode ocorrer ao longo de dias. Os autores afirmam que, entre os 7 e os 70 dias, a quantidade de etringita tende a diminuir e a de monossulfato a aumentar (Figura 2). Outro teor que subsidia a situação é o de C₄AF, que é de 10,65% para o CEM I 42,5 R. Assim como o monossulfato pode ser formado pela interação química entre o C₃A em excesso e a etringita primária, é possível o desenvolvimento de um composto semelhante pela reação entre a etringita inicial e o ferroaluminato tetracálcico, é a hidrogranada (C₄A(F)SH₁₈). Este tem formação e propriedades muito próximas às do monossulfato e, por natureza original do C₄AF, tende a ser formado mais lentamente, principalmente devido ao fato de que a reatividade da fase ferrita reduz à medida em que aumenta o teor de alumina.

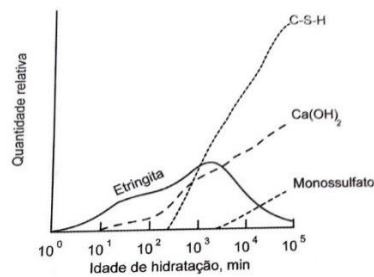


Figura 2: Formação dos produtos de hidratação. Fonte: Metha e Monteiro (2008)

A partir desses resultados, alguns apontamentos são imperativos:

- Quando curados a 20°C, os betões BC_400 e BACED_600 apresentaram reduzida ou nenhuma ocorrência de etringita, denotando a sua não formação.
- Quando curados a 50°C, aos 28 dias todos os betões apresentaram quantidade considerável de etringita, indicando que a etringita primária não se decompõe em virtude da exposição a essa temperatura e permanece na pasta.
- Quando curados a 80°C, o BC_400 e o BACED_600 não apresentaram etringita, denotando a decomposição da etringita primária, o que corrobora com a indicação da literatura.
- Os betões BC_400 e BACED_600 apresentaram comportamento semelhante. O BACED_500 apresentou comportamento constante com a variação da temperatura.

As figuras 3 a 5 retratam imagens feitas por MEV que indicam as presenças de monossulfato e pouca etringita aos 70 dias.

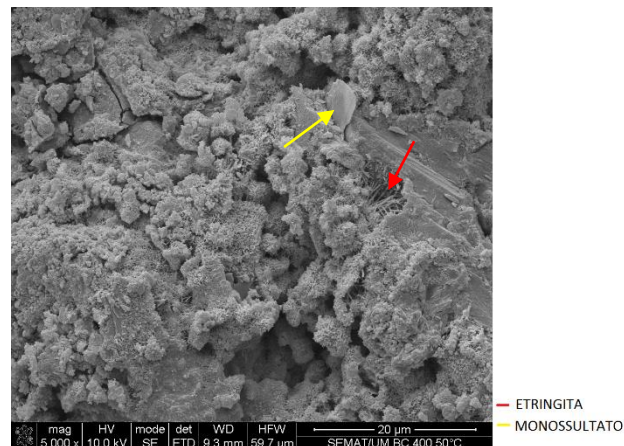


Figura 3: Imagem MEV BC_400 aos 70 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

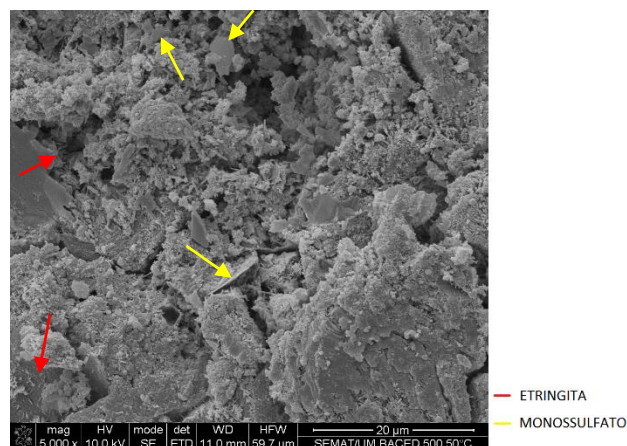


Figura 4: Imagem MEV BACED_500 aos 70 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

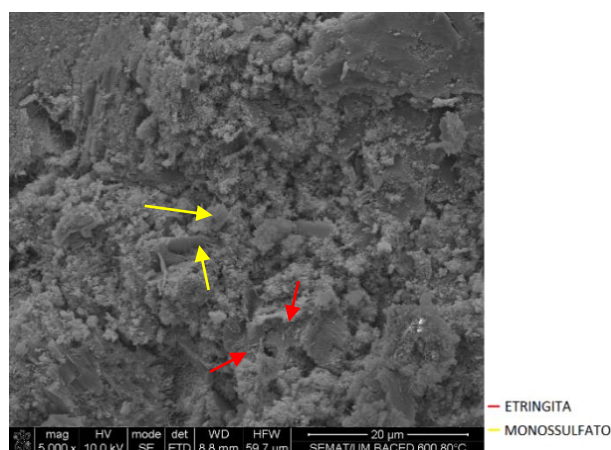


Figura 5: Imagem MEV BACED_600 aos 70 dias. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Propõe-se então a seguinte classificação: os betões que mostraram potencialidade na DEF através do monossulfato são considerados como de potencial moderado, haja vista o fato de que o CO_2 é bem mais reativo com o Ca(OH)_2 no processo de carbonatação – ver equação (2); que aqueles cujo potencial identificado ocorreu devido à precipitação da etringita primária mediante a cura térmica são classificados como de potencial elevado, devido ao fato de o fenômeno químico precisar apenas da presença de água – equação (3); aqueles curados a 20°C em que não houve quantificação aos 28 e aos 70 dias apresentaram baixíssima formação de etringita primária, assim como de secundária, o que implica em sua classificação como de potencial reduzido. A tabela 14 apresenta a classificação.

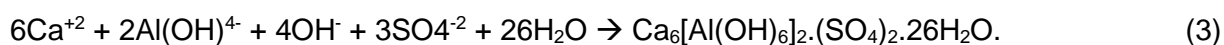
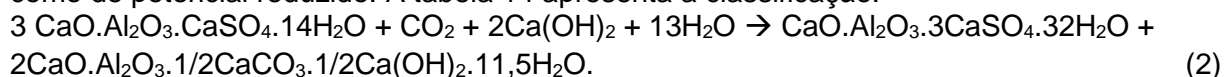


Tabela 14: Classificação para o potencial de ocorrência de DEF. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Temperatura de cura entre 24h e 48h	BC_400	BACED_500	BACED_600
20°C	Reduzido	Moderado	Reduzido
50°C	Moderado	Moderado	Moderado
80°C	Elevado	Moderado	Elevado

3.4. Ataque de sulfatos por fonte externa. Os resultados são indicados na tabela 15.

Tabela 15: Resultados ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Ciclo	BC_400	Variação de massa	BACED_500	Variação de massa	BACED_600	Variação de massa
1º ao 6º ciclo						
7º	2262,00	0,397%	2271,93	0,177%	2281,80	0,113%
8º	2254,97	-0,156%	2265,33	-0,145%	2275,87	-0,130%
9º	2249,60	-0,119%	2260,50	-0,107%	2270,67	-0,114%
Perda de massa total	0,28%		0,25%		0,24%	

O ensaio ocorreu por fases de imersão em solução e posterior secagem a 105°C. Isto, pois, de acordo com Skalný et al. [6], promove a cristalização dos sais nos poros dos betões e não a sua dissolução no interior do material, o que inibe o ataque dos íons SO_4^{2-} .

As perdas de massa e expansões ocorreram, portanto, em virtude das pressões geradas pela cristalização de sais nos poros. Conforme identificado na tabela 15 e considerando a maior porosidade do BC_400, verifica-se que este foi o mais afetado, pois é aquele em que pôde haver maior deposição dos sais. O aumento mais acentuado do peso desse betão ao longo dos ciclos também ratifica a ideia. A figura 6 ilustra os aspectos dos betões após o 9º ciclo.

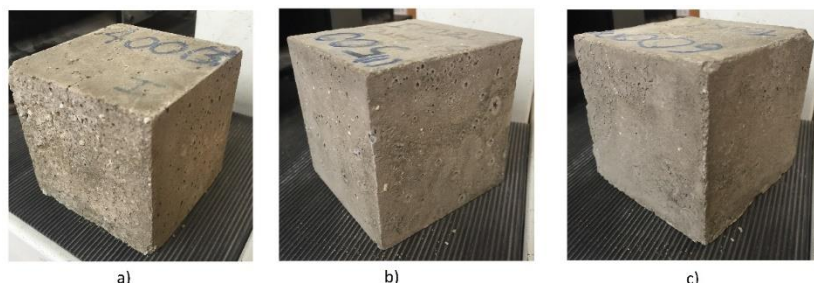


Figura 6: Aspectos dos provetes após o ensaio de ataque de sulfatos por fonte externa: a) BC_400; b) BACED_500; c) BACED_600. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Sob o contexto da formação de etringita secundária por ataque de sulfatos por fonte externa, desenvolveram-se as quantificações por DRX aos 70 dias. No entanto, assim como na análise por fonte interna, as amostras não apresentaram nenhuma quantidade do composto, o que foi esperado em função da deposição e não dissolução dos sais no betão.

3.5. Determinação do potencial de carbonatação. A tabela 16 indica os resultados.

Tabela 16: Resultados ensaio de profundidade de carbonatação. Fonte: Acervo pessoal (2016)

Períodos (dias)	Profundidade de carbonatação (mm)		
	BC_400	BACED_500	BACED_600
7	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00
30	17,00	13,10	0,00
40	17,50	14,40	0,00

A não ocorrência de carbonatação do BACED_600 dentro de 40 dias elucida, inicialmente, pouca disponibilidade de hidróxido de cálcio para reagir com o CO_2 . Porém o BACED_600 apresenta uma superfície bastante compacta, dificultando a penetração do gás. Sem a penetração do composto a ocorrência da carbonatação é portanto inibida.

4. Conclusões

No que se refere à resistência à compressão, os BACED apresentaram resultados intermédios, mas que não possibilitaram sua classificação como de elevada resistência. Deve-se ainda atentar que a adoção de elevado teor de cimento não foi suficiente para aumentar demasiadamente a resistência mecânica em questão; faz-se necessário, neste caso, um maior controle da porosidade do betão, aumentando a qualidade da pasta.

Em termos de resistência à difusão de cloretos, os betões especiais confirmam sua condição de elevado desempenho, bem como indicam serem materiais duráveis face a este ataque.

Quanto à formação de etringita secundária, a investigação proporcionou afirmar, dentre as configurações estudadas, aquelas que indicaram maior potencial de ocorrência de DEF. Em corroboração ao elucidado na literatura, a cura acima de 70°C foi bastante colaborativa para

a precipitação da etringita primária, sendo, contudo, o BACED_500 pouco expressivo quanto à precipitação deste composto mesmo submetido a 80°C. O betão de referência e o BACED_600 curados a 80°C foram os que indicaram maior suscetibilidade para a formação do composto tardio em virtude da temperatura de cura. Todos os betões são suscetíveis à ocorrência de DEF a partir da interação química entre CO₂ e monossulfato.

Dentre os betões especiais, o BACED_500 foi consideravelmente mais suscetível à carbonatação que o BACED_600. Apesar de apresentar maior quantidade de Ca(OH)₂ devido à maior dosagem de cimento, este último é mais compacto, o que dificulta a entrada do CO₂. Outra consideração a ser feita é a relação entre o potencial de carbonatação e a formação da etringita secundária a partir do monossulfato. Sabe-se que o BACED_500 apresenta potencial moderado para a formação da etringita secundária a partir do monossulfato, e que este material foi mais suscetível à carbonatação que o seu similar. Logo, o BACED_500 apresenta considerável potencial para a formação da etringita tardia através da reação entre o CO₂ e o monossulfato. O BACED_600, por sua vez, indicou baixa suscetibilidade à carbonatação, de modo que a formação de etringita secundária por meio do monossulfato é menos provável. Comparativamente, pode-se afirmar que o BACED_600 apresenta maior elevado desempenho que o seu similar, tendo em vista ter atingido valores mais satisfatórios que o BACED_500.

5. Referências

- [1] A. Camões: submitted to Seminário Inovação em Betões – Nova normalização e produção de betões especiais CONSTRUNOR (2006).
- [2] A. S. Coutinho: *Fabrico e propriedades do betão*. (LNEC, Portugal, 1988).
- [3] CEN/TS 12390-12 Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method. (European Committee for Standardization, Belgium, 2010).
- [4] E 463 Betão: Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário. (Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal, 2004).
- [5] J. B Aguiar: *Qualidade de betões* (Apontamentos Universidade do Minho, Portugal, 2015).
- [6] J. Skalny, J. Marchand and I. Older, in: Sulfate Attack on Concrete, edited by Spon Press, chapter, 5, Taylor & Francis e-Library (2002).
- [7] M. COLLEPARDI: A state-of-the art review on delayed ettringite attack on concrete (Cement and concrete research, Italy, 2003).
- [8] NP 1378 Agregados – Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio. (Repartição de Normalização IGPAI, Portugal, 1976).
- [9] P. K. Metha and P. J. M. Monteiro, in: Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais, edited by Nicole Pagan Hasparyk, chapter, 5, IBRACON (2008).
- [10] T. Luping: submitted to Chalmers Publication Library (1996).
- [11] V. C. M. SOUZA, and T. RIPPER, in: Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto, edited by PINI, chapter, 1, São Paulo (1998).